



天津中德应用技术大学
Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

本科生毕业设计

植保无人机机架结构设计优化
Optimization of Frame Structure Design of Plant
Protection UAV

姓 名 吴江涛

学 院 航空航天学院

专 业 飞行器制造工程

指导教师 张健

职 称 讲师

完成时间 2022年5月30日



天津中德应用技术大学
Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

本科生毕业设计

植保无人机机架结构设计优化
Optimization of Frame Structure Design of Plant
Protection UAV

姓 名 吴江涛

学 院 航空航天学院

专 业 飞行器制造工程

指导教师 张健

职 称 讲师

完成时间 2022年5月30日

天津中德应用技术大学

本科生毕业设计（论文）选题申报表

学 院	航空航天学院		申 报 人	姓 名	张健		
专 业	飞行器制造工程			技术职务	正高	副高	中级
题目名称	植保无人机机架结构设计						
题目类型	自拟	题目来源	其他项目				
课题来源、背景及意义	<p>随着无人机技术在农业植保方面的广泛应用,对无人机要求越来越高,植保无人机一般为 10 公斤以上的负载能力,植保无人机的体积和重量均比较大,无人机的重量及结构对其作业飞行具有一定的影响;同时,植保无人机在运输和存放的条件下,需要占地空间小等特点。因此,本题目利用拓扑优化方法,对植保无人机结构进行设计。</p>						
任务及要求	<p>1.完成植保无人机机架轻量化设计; 2.完成植保无人机折叠机构的设计; 3.完成植保无人机强度验证。</p>						
工作条件	Solidworks 建模软件, 拓扑优化软件						
知识与能力要求	<p>具有文献检索、收集资料及使用各种设计规范、手册和技术标准的能力; 具有飞机结构设计基本知识; 具有机械设计原理基础知识; 具有三维建模的能力。</p>						
系（教研室）审查意见：							
无							
负责人(签名)： <u>张健</u> 2021 年 11 月 28 日							



天津中德应用技术大学
Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

毕业设计（论文）任务书

题 目：植保机机架结构设计优化

学 院：航空航天学院

专 业：飞行器制造工程

学生姓名：吴江涛

学 号：18414020314

起止日期：2021年12月3日~2022年6月3日

指导教师：张健

任务书下达日期：2021年12月3日

任务书填写要求

1. 毕业设计（论文）任务书由指导教师根据各课题的具体情况填写，经专业负责人审查签字后生效。此任务书应在毕业设计（论文）开始前一周内填好并发给学生；

2. 任务书内填写的内容，必须和学生毕业设计（论文）完成的情况相一致；

3. 任务书内有关“学院”、“专业”等名称的填写，应写中文全称，不能写数字代码。学生的“学号”要写全号（如：16014010101）；

4. 有关年月日等日期的填写，应当按照国标 GB/T 7408—94《数据元和交换格式、信息交换、日期和时间表示法》规定的要求，一律用阿拉伯数字书写。如“2004年3月21日”或“2004-03-21”。

5. 本毕业设计（论文）课题成果的要求，内容要具体化和数量化。如“毕业设计（论文）一套；A0号装配图纸1张；A2号电气控制原理图纸2张；实物样机1台；产品2件”等。

毕 业 设 计（论 文）任 务 书

1. 毕业设计（论文）课题背景及意义

随着现代科技的发展，农业生产机械化开始普及，农业的发展对于国家的发展有着重要作用，农业机械化是现代农业生产的第一生产力。它有利于提高现代农业生产过程中的效率、降低农业生产的成本。从而获得更多的社会效益和经济效益，现代植保机可用来喷洒作业，可以喷洒药液、种子、粉剂等。现代农业发展正随着科技的进步向大型化、精准化、智能化迈进。传统的人工喷洒药液等进行农作物病虫害防治时因劳动力太大而无法实现现代农业要求。而植保机优化可以使得自主作业、轻松精准、机械代替了人工，又可以提高效率、增加覆盖面积，劳动强度小，也无需下田，更不会损坏农作物。作业区域不受地形条件限制，还可以省药、省水，更环保，极大地降低了资源成本，远距离遥控操作，操作人员也极大地避免了农药的危害，对操作人员也是一种保护，更具有安全性。对植保机结构进行有效设计优化就会使得它的作用及效益得到最大化。

2. 毕业设计（论文）课题任务的内容和要求

工作内容及要求：

(1) 完成植保机机架架构设计优化。

分析机架结构与其连接部件的尺寸要求以及力学性能要求，熟悉各组成部件在空中飞行所受到的气动外力和自身载重负荷时各部件的承力特点以及传力方式，然后根据要求选择合适的组件组合在一起。

(2) 利用 Solidworks 软件对设计出来的各部件进行三维绘图建模。

运用 Solidworks 软件，构建模型，对机架及连接部件建模，并模拟受力分析。

(3) 运用 CosmosWorks 对设计优化出的机架结构部件进行受力分析和有限元分析。

采用 Solidworks 软件里的 CosmosWorks 插件，对所设计出来的机架结构部件进行有限元分析，分析其满足结构力学的设计性能，以及检验所设计出来的机架结构是否满足设计要求。

3. 毕业设计（论文）课题成果（包括毕业设计论文、图表、实物样品等）：

(1) 毕业设计（论文）一套

(2) Solidworks 三维设计模型一套

4. 推荐参考资料:

- [1] 张永庆. 浅析 COSMOSWORKS 在有限元分析中的应用[J]. 机械, 2005, 000(0S1):53-55.
- [2] 吴亚萍. 果园植保机械应用现状及发展趋势[J]. 林业科技通讯, 2021(10):63-66. DOI:10.13456/j.cnki.lykt.2020.12.20.0001.
- [3] 袁家盈, 方瑞亮. 高效植保无人机在农业生产中的发展和应用[J]. 山东农机化, 2021(05):38-39. DOI:10.15976/j.cnki.37-1123/s.2021.05.019.
- [4] 尚忠, 于建波, 姜秀美, 张雪芹, 张金超. 遥控式靶向精量减施增效植保机研究与开发[J]. 农业机械, 2021(09):98-100. DOI:10.16167/j.cnki.1000-9868.2021.09.051.
- [5] 刘向尧, 杨登红, 詹家礼. 国内植保机行业的研究现状与展望[J]. 贵州农机化, 2019(01):11-18+51.
- [6] 朱为德, 袁俊云, 杨青, 尹传红. 威鹰无人机植保与人工植保的对比试验[J]. 内蒙古林业调查设计, 2021, 44(04):37-38+36. DOI:10.13387/j.cnki.nmld.2021.04.014.
- [7] 关薪, 李杭, 李树江. 植保机喷杆位置滑模控制系统设计[C]//第十八届沈阳科学学术年会论文集. [出版者不详], 2021:1072-1077. DOI:10.26914/c.cnkihy.2021.010024.
- [8] 徐明. 农用植保机械的关键技术及其在我国农业的应用情况[J]. 农机使用与维修, 2021(05):23-24. DOI:10.14031/j.cnki.njwx.2021.05.009.
- [9] 李茂源, 李树江, 郭爱静. 植保机钟摆式喷杆主动悬架自适应模糊控制[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(12):70-75+80. DOI:10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2020.12.015.
- [10] Patents; Patent Application Titled "Controlled Rain and Fog Testing Apparatus" Published Online (USPTO 20170108434)[J]. Electronics Newsweekly, 2017, : 1271-.
- [11] Martin Trinder and Mark Jabbal. Development of a Smoke Visualisation System for Wind Tunnel Laboratory Experiments[J]. International Journal of Mechanical Engineering Education, 2013, 41(1): 27-43.

所在专业审查意见:

同意

负责人: 张健

2021年12月8日



天津中德应用技术大学

Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

本科生毕业设计（论文）开题报告

题 目： 植保机机架结构设计优化

学 院： 航空航天学院

专 业： 飞行器制造工程

学生姓名： 吴江涛

学 号： 18414020314

起止日期： 2021年12月3日~2022年6月3日

指导教师： 张健

开题日期：2022年3月5日

一、开题报告内容（课题的目的意义、与本课题有关的国内外研究（应用）情况及发展趋势、课题主要研究内容、参考文献等）

1. 研究意义

研究农用植保机它有利于提高现代农业生产过程中的效率、降低农业生产的成本。从而获得更多的社会效益和经济效益。

1. 植保无人机多为 10 公斤以上负载，植保无人机的体积和重量均比较大，无人机的重量及结构对其作业有一定的影响。植保无人机，就是用于农业植保药剂喷洒作业的无人驾驶飞机，该型无人飞机有飞行平台（固定翼、单旋翼、多旋翼）、GPS 飞控、喷洒机构三部分组成，通过地面遥控或 GPS 飞控，来实现喷洒作业。目前植保无人机分为电动无人机和油动无人机两种。电动机一般可负载 5-10 公斤农药，油动机一般可负载 10-20 公斤农药。

2. 植保无人机在运输和存放的条件下，需要占地空间小等特点。

长期存放条件：

- （1）环境适宜：存放环境要求安全、清洁、干燥、阴凉。
- （2）清点登记：清点登记将要长期存放的设备。
- （3）分门别类：不同类型的设备分开隔离存放，如不可将灌药机、药箱与电池等混放。
- （4）整齐有序：摆放整齐有序，不得直接堆积码放。
- （5）特殊设备定期检查：如带电设备（智能电池）则应定期检查充电。

注意事项：

- （1）存放前将无人机清洗干净，尤其是喷洒系统要清洗排空，不得有药业残留。
- （2）存放于安全、清洁、干燥、阴凉之处，防火、防盗、防潮。
- （3）摆放整齐，不得直接堆积码放，最好摆在货架上。

对植保机结构进行有效设计优化就会使得它的作用及效益得到最大化。植保无人机超高的工作效率和劳动力、农业投入成本的节省节约，大大增加了农民的经济效益，推动农业快速发展，应用植保无人机作业具有相当大的经济和社会价值。

2. 国内外研究现状及发展趋势

（1）国内现状

植保无人机分为多旋翼植保机无人机、共轴直升机和单旋翼植保无人机，按动力混合机型的方式划分为电动多旋翼植保无人机、油动多旋翼植保无人机、油电动多旋翼植保无人机、油动变距植保无人机。

1、按照不同平台构型来分类：

无人机可主要有固定翼无人机、无人直升机和多旋翼无人机三大平台，其它小种类无人机平台还包括伞翼无人机、扑翼无人机和无人飞船等。

2、按不同使用领域来分类：

无人机可分为军用、民用和消费级三大类。

3、按任务高度分类：

无人机可以分为超低空无人机、低空无人机、中空无人机。

植保无人机的机架结构，包括：动力机架，包括第一安装架和设于第一安装架周向上的多个机臂，机臂的一端固定于第一安装架上，另一端用于安装电机和旋翼；与多个机臂一一对应的快拆组件，包括固定部、活动杆和锁紧件，固定部固设于机臂上，活动杆的一端铰接于固定部上，锁紧件安装于活动杆上并与活动杆螺纹配合；下机架，设于动力机架下方，下机架包括第二安装架和多个脚架，脚架的固设于第二安装架上，第二安装架上设有载物板和与多个机臂一一对应的连接部，载物板用于安装水泵、喷洒物存储装置和电池，连接部用于被锁紧件锁紧于固定部上，连接部上设有用于容纳活动杆的容纳槽，容纳槽的一侧设有可供活动杆穿过并远离该容纳槽的槽口。

目前我国植保机械中手动植保机械占整个市场份额 80%左右。现在我国施药方式仍是以“大份量，雨淋式”的喷雾为主，其农药利用率较低，不仅浪费资源，还增加农民的负担，并且对周围环境造成不必要的污染。现如今植保机发展随着民用无人机的发展，植保无人机也开始“飞”入寻常百姓家中，据有关人士称，随着土地流转规模的扩大，我国的植保无人机产业存在着巨大的潜力，无人植保机发展前景十分可观。

（2）国外现状

20 世纪中期，农业发达国家就逐渐形成以大农业为主的规模化经营，机械化逐渐得到全面化，农作物的病虫害防治和化学除草采用大型悬挂式或牵引式喷杆喷雾机，国外大中型都是具备 4 级过滤系统，在系统中还加装自洁压力过滤器。国外先进植保技术有风送喷雾技术、静电喷雾技术，光电技术、自动对靶施药技术等。依据施药对象和环境条件严格控制药量，有些还配备 GPS 系统，实现精准、精量施药。德国还有设置农药回收装置，利用静电或气流负压等技术将靶标外的雾滴农药收回。

（3）发展趋势

现代农业发展正随着科技的进步向大型化、精准化、智能化迈进。而植保机优化可以使得自主作业、轻松精准、机械代替了人工，又可以提高效率、增加覆盖面积，劳动强度小，也无需下田，更不会损坏农作物。作业区域不受地形条件限制，还可以省药、省水，更环保，极大地降低了资源成本，远距离遥控操作，操作人员也极大地避免了农药的危害，对操作人员也是一种保护，更具有安全性。但由于无人机价格却令人望而却步，阻碍了绝大多数农业大户使用植保机。因此，设计解决植保无人机成本、轻量化、可操作性等成为主要发展趋势，研究其机械结构轻量化能够有效减重也能降低重量。

3. 课题主要研究内容

(1) 课题研究优化一些机架结构、设计, 让植保机机架结构更加轻量化、经济性、操作性以及载荷等得到较大提升, 让其具有高强度, 而且机架受力均匀, 能够较好地传力, 能全面的保护无人植保机的安全。并采用廉价金属材料, 降低其成本, 节约材料。

(2) 分析机架结构与其连接部件的尺寸要求以及力学性能要求, 熟悉各组成部件在空中飞行所受到的气动外力和自身载重负荷时各部件的承力特点以及传力方式。

(3) 拓扑优化是根据一定的约束条件, 如满足材料的许用应力、设计所允许的最大位移、结构所需要的相应刚度等条件下, 在结构上开洞、去除相应的构件, 使结构材料整体的布局在满足设计要求的情况下达到最优。参考飞机设计手册相关内容, 然后根据要求选择合适的组件在一起。

(4) 采用 Solidworks 软件里的 CosmosWorks 插件, 对所设计出来的机架结构部件进行有限元分析, 验证其满足结构力学的设计性能。植保机优化可以使得自主作业, 机械代替了人工, 又可以提高效率、增加覆盖面积, 劳动强度小。对植保机结构进行有效设计优化就会使得它的作用及效益得到最大化。

参考文献

- [1] 吴亚萍. 果园植保机械应用现状及发展趋势[J]. 林业科技通讯, 2021(10):63-66. DOI:10.13456/j.cnki.lykt.2020.12.20.0001.
- [2] 张永庆. 浅析 COSMOSWORKS 在有限元分析中的应用[J]. 机械, 2005, 000(0S1):53-55.
- [3] 王卫斌. 磨炼高超技能 服务乡村振兴[N]. 吕梁日报, 2021-11-16(002). DOI:10.28546/n.cnki.nlvr. 2021. 002422.
- [4] 刘向尧, 杨登红, 詹家礼. 国内植保机行业的研究现状与展望[J]. 贵州农机化, 2019(01):11-18+51.
- [5] 邱振球, 吴生根, 吴安文, 杜金平, 罗建军, 付庶辉. 现代高效植保机械在进贤县发展现状及发展前景的探讨[J]. 江西农业, 2017(01):125-126. DOI:10.19394/j.cnki.issn1674-4179. 2017. 01. 104.
- [6] 王旭景, 刘绍锋. 无人植保机的结构原理与推广应用[J]. 时代农机, 2015,42(06):10-11+14
- [7] 柳琪. 无人机正在快速替代传统植保机[J]. 农机市场, 2020(12):12..
- [8] 徐明. 农用植保机械的关键技术及其在我国农业的应用情况[J]. 农机使用与维修, 2021(05):23-24. DOI:10.14031/j.cnki.njwx.2021.05.009.

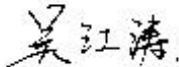
- [9] 吴天.两款新型植保无人机[J].农村新技术,2020(12):43.
- [10] 李凤玲. 无人植保机技术的推广难点及策略分析[J]. 农业开发与装备, 2020(08) :136+140.
- [11] 周国毅. 水稻机械化高效植保作业技术的运用探讨[J]. 种子科技,2020,38(15):95-96.
- [12] Toyo Jidoki Co. Ltd.; Patent Issued for Gripper Device For A Bag Filling And Packaging Machine (USPTO 10,800,563)[J]. Journal of Engineering, 2020, : 8626-.

二、进度及预期结果

起止日期	主要内容	预期结果
2021. 12. 04- 12. 31 2022. 01. 03- 02. 28 2022. 02. 28- 04. 01 2022. 04. 01- 05. 01	<p>对论文前期铺垫进行论文查询，进行前期准备。</p> <p>对开题报告部分内容进行完善，查询国内外课题研究现状。</p> <p>完成植保机机架架构设计优化。优化一些机架结构、设计，让植保机机架结构更加轻量化、经济性、操作性以及载荷等得到较大提升，采用 Solidworks 软件里的 CosmosWorks 插件，对所设计出来的机架结构部件进行有限元分析，验证其满足结构力学的设计性能。</p> <p>完成论文其他内容。</p>	<p>资料整理</p> <p>开题报告</p> <p>完成植保机机架架构设计优化。</p> <p>(1) 毕业设计（论文）一套</p> <p>(2) Solidworks 三维设计模型一套</p>
完成课题的 现有条件	<p>利用 Solidworks 软件对设计出来的各部件进行三维绘图建模。运用 Solidworks 软件，构建模型，对机架及连接部件建模，并模拟受力分析。</p> <p>运用 CosmosWorks 对设计优化出的机架结构部件进行受力分析和有限元分析。采用 Solidworks 软件里的 CosmosWorks 插件，对所设计出来的机架结构部件进行有限元分析，分析其满足结构力学的设计性能，以及检验所设计出来的机架结构是否满足设计要求。</p>	
指导教师 意见	<p>同意开题</p> <p style="text-align: right;">指导教师： <u>张健</u> <u>2022年3月5日</u></p>	
开题答辩 小组意见	<p>同意开题</p> <p style="text-align: right;">组 长： <u>张健</u> <u>2022年3月5日</u></p>	

天津中德应用技术大学 本科生毕业论文（设计）的声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在指导教师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或没有公开发表的作品内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：  吴江涛
年 月 日

本人声明：该学位论文是本人指导学生完成的研究成果，已经审阅过论文的全部内容，并能够保证题目、关键词、摘要部分中英文内容的一致性和准确性。

学位论文指导教师签名：
年 月 日

摘 要

随着无人机技术在农业植保方面的广泛应用，对无人机要求越来越高，研究植保无人机有利于提高现代农业在生产过程中的效率，还会降低农业生产的成本。

现有的植保无人机机架结构均为“X”型构架式，采用碳纤维材料，成本高，并且机臂连接处受力较大，易发生断裂现象，结构受力具有一定局限性。因此，本文基于旋翼无人机受力特征，设计一种 10 公斤级四旋翼植保无人机，并对无人机结构进行轻量化设计。

本文主要采用拓扑优化的方法对选取的四旋翼植保无人机初始模型进行轻量化设计，并对优化后的无人机机架模型结构进行静力学分析，验证其强度。最后，得到轻量化后的植保无人机机架模型，其结构受力更加合理，强度能够满足植保无人机组载重方面的需求。

关键词：植保无人机；静力学分析；拓扑优化；有限元分析；

ABSTRACT

With the wide application of UAV technology in agricultural plant protection, the requirements for UAVs are getting higher and higher, and the study of plant protection UAVs is conducive to improving the efficiency of modern agriculture in the production process, and will also reduce the cost of agricultural production.

The existing plant protection UAV frame structure is "X" structure, using carbon fiber material, high cost, and the arm connection is subject to a large force, prone to fracture, structural force has certain limitations. Therefore, based on the force characteristics of rotor UAV, this paper designs a 10 kg quadcopter plant protection UAV and lightweight design of the UAV structure.

In this paper, the topology optimization method is mainly used to lightweight design the initial model of the selected quadrotor plant protection UAV, and the static analysis of the optimized UAV frame model structure is carried out to verify its strength. Finally, the lightweight plant protection UAV frame model is obtained, and its structural force is more reasonable, and the strength can meet the needs of the plant protection UAV load.

Key words: plant protection UAV, static analysis, topology optimization, finite element analysis;

目 录

第一章 绪论	1
1.1 选题的背景和意义	1
1.2 四旋翼无人机国内外发展状况	1
1.3 本文研究目的和内容	4
第二章 植保无人机机架方案设计	6
2.1 无人机设计技术要求	6
2.2 无人机设计指标	6
2.3 确定升力	6
2.4 螺旋桨设计	7
2.5 电动机设计	8
2.6 预估整机重量	9
2.7 本章小结	9
第三章 初始模型结构强度分析	10
3.1 材料与基本属性	10
3.2 初始模型的尺寸及重量	10
3.3 初始模型的起飞工况	10
3.4 初始模型的静力分析	11
3.5 初始模型的结构强度总结	13
3.6 本章小结	13
第四章 初始机架结构拓补优化	14
4.1 拓补优化原理	14
4.2 优化过程及优化后云图	14
4.3 优化后建模	17
4.4 优化后模型静力载荷分析	17
4.5 其余部件建模	18
4.6 装配完模型图样	22
4.7 本章小结	23
第五章 总结及展望	24
5.1 工作总结	24
5.2 展望	24

致 谢.....	26
参考文献:	27

第一章 绪论

1.1 选题的背景和意义

随着科学技术的进步，我国的农业生产逐渐走向了大众化。这对提高农业生产效率、降低农业生产费用具有重要意义。现代化的植物保护器可以用于喷洒药液、种子、粉剂等。随着科学技术的发展，现代农业正在朝着大型化、精准化和智能化方向发展。在采用人工喷施药剂防治作物病虫害时，由于人力过多，难以满足现代化农业的需要。而且，通过对植保机结构的改造，可以实现自动化作业，轻松精准，机械代替手工，提高效率，增加覆盖面积，减少劳力，不用耕种，也不会对庄稼造成伤害。工作场地不受限于地势，而且可以节省药物和水，环境友好，大大减少了能源消耗和远程控制。同时，对操作者来说，也能很好地防止杀虫剂的伤害，同时也能起到一定的防护作用，使其更加安全。合理地优化种植机械的结构，可以使其功能和效益最好。农业机械的研制对农业生产效率的提升和农业生产的降低都是有益的。其结果是，具有较大的社会和经济价值。

植保中国无人机多为 10 公斤以上动态负载，植保无人机的尺寸和重量均不太大，无人机的重量很轻及结构对其作业有一定的影响不大。植保小型无人机，就是常用于农业植保解毒药剂喷洒作业的无人驾驶民航机，该型无人美国飞机有飞行平台（固定翼、单旋翼、多旋翼）、GPS 飞控、喷洒机构三部分由多，实现地面遥控或 GPS 飞控，来实现喷壶作业。截止植保无人机技术分为电动无人机和油动无人机两种。电动机驱动大多数可负载 5—10 公斤化肥，油动的动机多数可负载 10—20 公斤农药。

目前来讲，四旋翼植保无人机来说其执行的任务的完成两类喷洒作业，不仅要带着这些相关的设备在空中予以去完成，也就是在有载重能力很强的同时还更需要续航抗压能力，而也是现在的四旋翼植保无人机来说，对四旋翼植保无人机开展轻可量化对提高其有效承载力强和续航能力都有很重要的实用效果。主要工作重点为四旋翼植保无人机的重量更轻优化，多种渠道对机架结构进行功能优化使其方便舒适系统存储，可折叠化。对植保机结构经过有效大胆设计优化就会使得它的作用及效益拿到最大价值。植保无人机超高的办公效率和劳动力、农业投入成本的节省节约时间，大幅增加了农民的社会效益和经济效益，推动农业技术更为快速的发展，应用植保无人机家庭作业具有十分大的经济价值和社会价值。

1.2 四旋翼无人机国内外发展状况

(1) 国内现状

植保无人机分为三种：多旋翼、多旋翼、共轴、单旋翼，按照动力混合模式分为电动、油动式多旋翼、油电动多旋翼无人机、电池动力变距无人机。

我国农业、林业、植保无人机的开发历史比较长，在 2005 年才开始自主研发，2010 年正式投入市场。直至 2013 年 5 月，农林、植保无人机才在农业部《关于加快推进现代职务保护体系建设的意见》中提出，要大力发展农业航空。到现在为止，大疆的无人机已经垄断了中国农业、林业和植保无人机的市场份额，其市场占有率约为 90%。



图 1-1 EFTG410 插拔式 10 公斤植保无人机



图 1-2 大疆某型号植保无人机

植保无人机的机架主要结构，包括：动力托架，主要包括第一安装架和设于稳居按装架周向上的多个旋翼头，机臂的中间位置固定于第一安装架上，另尾端用于安装好驱动电机和旋翼。与多个机臂一并对应的快拆各种组件，包括固定部、活动杆和锁紧件，固定部固设于机臂上，活动杆的一端铰接于固定部上，锁压脚板安装于活动杆上并与活动杆螺纹配合。下轴承支座，设于动力机架上方，下设备底座包括位居新安装架和多个脚架，脚架的固设于第 4 安装搁放，第二安装支起来设有载物板和与多个机臂一样样对应的连接部，载物板用于安装一排水泵、

喷洒物存储装置设计和电池，连接部用于被锁紧件顶紧于固定部位上，连接部上设有用作可容纳人数活动杆的内部空间槽，容纳槽的对侧设有可供活动杆走过并远离该容纳槽的槽口。

人工植保机械在国内的市场占有率约为 80%。目前，国内采用“大剂量、雨淋”的喷洒方法，农药利用率低，既浪费了大量的资源，又给农户带来了沉重的负担，也给周边环境带来了无谓的污染。如今，随着植保机的发展，植保无人机也“飞”进了普通人家，根据相关人士透露，随着土地的不断扩张，未来的发展空间非常广阔。

(2) 国外的情况

20 世纪中叶，主要由农业大国主导，逐步实现了大规模生产，并逐步实现了机械化，主要是利用大型的悬臂或拖杆喷头进行防治，国外主要的大中型企业都有 4 级过滤，并在系统内安装了自洁的压力过滤器。目前国外的植保技术主要有：送风喷雾、静电喷雾、光电、自动靶向等。根据施药对象、施药环境等因素，严格控制施药剂量，有的还配有 GPS，实现精确、精量的施药。德国也设有杀虫剂回收设备，通过静电或空气负压等技术将多余杀虫剂从植物标靶上回收。

日本在 80 年代就开始了植保无人驾驶飞机的研发。1983 年，雅马哈公司收到了日本农业和林业部门（日本中央厅）的请求，希望能研制出一架单螺旋桨无人驾驶直升机。在四年的研究和摸索之后，R-50 型无人驾驶直升机诞生了。最近几年，日本开始使用无人机对水稻、松树进行监测，也可以预报出最好的收获时间。日本在经历了几年的发展后，已跻身于全球农业无人喷洒农药的国家。



图 1-3 日本某型号植保无人机



图 1-4 德国某型号植保无人机

(3) 发展趋势

随着科学技术的发展，现代农业正在朝着大型化、精准化、智能化方向发展。而植保机的优化，可以实现自动作业，轻松精准，机械代替手工，提高工作效率，增加覆盖面积，减少劳力，不用耕种，也不会对庄稼造成伤害。工作场地不受地形条件的制约，节约药物、节约水、环境友好，大大减少了资源消耗，远程控制，大大减少了使用杀虫剂的危险，同时也为操作者提供了一种安全保障。但是，由于无人机的价格太高，使得大部分农民无法选择植保机。所以，如何解决植保无人机的成本、轻量化和可操作性是当前无人机发展的主要方向。

1.3 本文研究目的和内容

本文通过对选取的四旋翼植保无人机机架结构进行轻量化优化，优化使其载重能力更强、续航能力更持久。课题研究优化一些机架结构、设计，让植保无人机机架结构更加轻量化、经济性、操作性以及载荷等得到较大提升，让其具有高强度，而且机架受力均匀，能够较好地传力，能全面的保护无人植保机的安全。分析机架结构与其连接部件的尺寸要求以及力学性能要求，熟悉各组成部件在空中飞行所受到的气动外力和自身载重负荷时各部件的承力特点以及传力的方式。

主要研究内容如下：

第一章主要介绍四旋翼植保无人机国内外研究背景及情况，介绍发展趋势，选题背景，完成对课题的选择，介绍主要研究内容及方法。

第二章主要对四旋翼植保无人机基本组成进行分析计算，因主要是设计植保机架，缺少相应参数，所以主要是先整体预估计植保无人机自身重量、计算升力、选取电机、螺旋桨，确定基本尺寸等。

第三章是对照第二章数据，用 Solidworks 软件建立三维初始模型，进行材料选择，并且验证前期模型机架强度。

第四章主要对初始模型利用 Hypermesh 软件进行拓补优化，并且对优化后的结果做出对比，建立优化后的三维模型。采用 Solidworks 软件，对所设计出来的机架结构部件进行有限元分析，验证其满足结构力学的设计性能。

第五章主要是进行工作的总结及展望。

植保无人机优化可以使得自主作业，机械代替了人工，又可以提高效率、增加覆盖面积，劳动强度小。对植保机结构进行有效设计优化就会使得它的作用及效益得到最大化。

第二章 植保无人机机架方案设计

2.1 无人机设计技术要求

一般植保无人机的机身主体分为：机架和起落架两个部分。在对植保无人机机架结构进行设计前要先进行总体设计，即首先要确定升力，预估整机重量，螺旋桨设计，电动机设计选定等。

2.2 无人机设计指标

目标设计一款机架使用铝合金材料，有效载荷：10 KG，四旋翼植保无人机，机身长度 1120 mm，宽度 1120 mm，中控室厚度为 200 mm，总高度为 450 mm，下图为设计图样，图样比例 1:20。

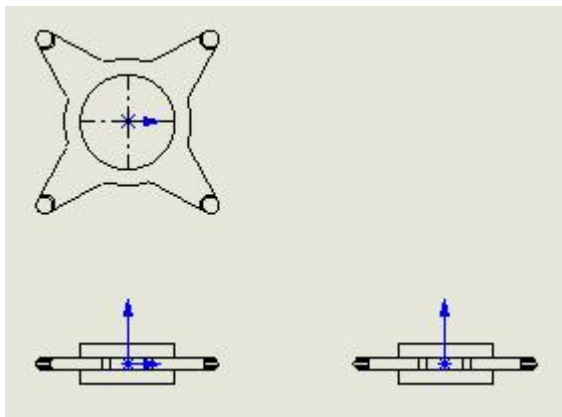


图 2-1 设计结构方案三视图

2.3 确定升力

计算悬停时螺旋桨产生的升力。植保无人机的实际需求主要有悬停时间、最大负载、最大飞行距离等，相应的主要工作状态是一定的悬停条件下或以一定的速度前行喷洒作业，悬停可以看作是向前飞行速度为 0 的飞行。根据植保无人机主工作状态，可以确定螺旋桨需要提供的升力。在无人机前行的条件下，其飞行速度与无人机的俯仰角、螺旋桨产生的升力之间的关系如图 2-2 所示，可以建立一下受力平衡方程式：

$$F_{drag} = G \tan \theta \quad (2-1)$$

$$F = \frac{G}{n_x \cos \theta} \quad (2-2)$$

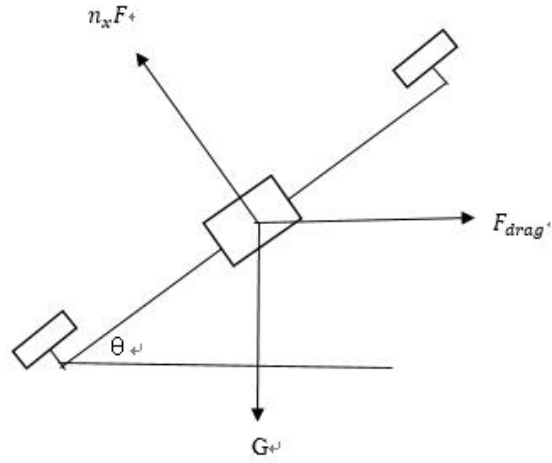


图 2-2 多旋翼无人机飞行受力图

在公式中， G 为多旋翼无人机所受重力； F 为单个螺旋桨产生的升力； F_{drag} 为作用在多旋翼无人机上的阻力； n_x 为螺旋桨个数； θ 为飞行俯仰角。在这其中， F_{drag} 可以近似的表示为：

$$F_{drag} = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 \quad (2-3)$$

在公式中， C_D 为多旋翼无人机整机阻力系数，与飞行俯仰角和机架外形有关，可通过实验或 CFD 软件进行仿真得到； ρ 为空气密度； V 为飞行速度； S 为飞行器最大截面的面积。

在悬停状态下， n_x 个螺旋桨所产生的升力总和等于飞行器的总质量 G ，单个螺旋桨产生的升力 F 为：

$$F = \frac{G}{n_x} \quad (2-4)$$

由公式 (2-1)、(2-2)、(2-3)、(2-4) 得到螺旋桨需要产生的升力 F 之后，可得单个螺旋桨需产生的升力 $F=31.06 \text{ N}$ 。

2.4 螺旋桨设计

根据升力需求、螺旋桨实际尺寸限制等，可以从现有的标准螺旋桨中选择适当的型号，选定螺旋桨后，由螺旋桨的升力、扭矩、转速等特性，可以得到螺旋桨产生升力 F 时的转速 ω 和需要电机提供的扭矩 M ，所用公式如下：

$$\omega = 60 \sqrt{\frac{F}{C_y \rho D^2}} \quad (2-5)$$

$$M = C_M \rho \left(\frac{\omega}{60}\right)^2 D^2 \quad (2-6)$$

因升力成因比较复杂，因为要考虑实际流体的粘性、可压缩性等诸多条件。根据螺旋桨尺寸限制，为安全起见，可预选同等级质量某品牌常用 2170 折叠桨。如图 2-3。



图 2-3 2170 螺旋桨

2.5 电动机设计

多旋翼无人机在特定工作状态下（如悬停）时，有稳定的占空比，所以根据无人机工作状态可以预估占空比 δ （比如在悬停时无人机占空比一般在 50%~65%，不同无人机因机动性需求不同而有所差异），进而预估电动机的等效工作电压 U_m 。由于电机内阻 R_m 和空载电流 I_{m0} 普遍较小，并且变化不大，因此在选择电机时，主要是 KV 值，可预计估计电动机内阻和空载电流。将估计的电动机参数与螺旋桨所需转速 ω 和扭矩 M 代入电动电机模型，可以得到电动机 KV 值和等效工作电流 I_m ，所用公式如下：

$$K_E = \frac{U_{m0} - I_{m0}R_m}{K_V U_{m0}} \approx 1/K_V \quad (2-7)$$

$$K_M = \frac{30}{\pi} K_E \quad (2-8)$$

$$I_m = \frac{M}{K_M} + I_{m0} \quad (2-9)$$

$$U_m = K_E \omega + R_m I_m \quad (2-10)$$

$$U_m \approx \sigma U_b \quad (2-11)$$

然后将得到的电机 KV 值与现有电机进行比对，即可选择出近似的 kv 值的标准的电动机。根据实际电机 KV 值，可选择 130KV 值的 6010 电动机如图 2-4。



图 2-4 130KV 值 6010 电机

2.6 预估整机重量

为了方便设计出满足无人机需求的电力推进系统，即首先要预估计整机质量，来确定无人机到底需要多大的升力。由于电力推系统还未选定，仅能参考同等级植保无人机。对标大疆：Phantom4 RTK 植保无人机，最大起飞重量：10 KG。四旋翼植保无人机尺寸机身长度 1120 mm，整体宽度为 1120 mm，高度为 450 mm，一般 10 公斤级植保无人机自重 10kg 左右。目标设计植保无人机。负载设备等质量和大致的电力推进系统设备来估计整机质量。

植保无人机预估计起飞载荷 10 kg，电力推进系统中每套螺旋桨、电动机、电调组合质量可预估计为 120 g，电池预估计重量 500 g，预估计植保无人机总质量 10980 g。

2.7 本章小结

本章介绍了四旋翼植保无人机机架结构设计过程，并且设计主要部件螺旋桨、电动机。该过程中将确定旋翼的个数：四旋翼植保无人机，螺旋桨主要参数，选定桨叶 2170、电机 6010 型号，预估计植保无人机自重。

第三章 初始模型结构强度分析

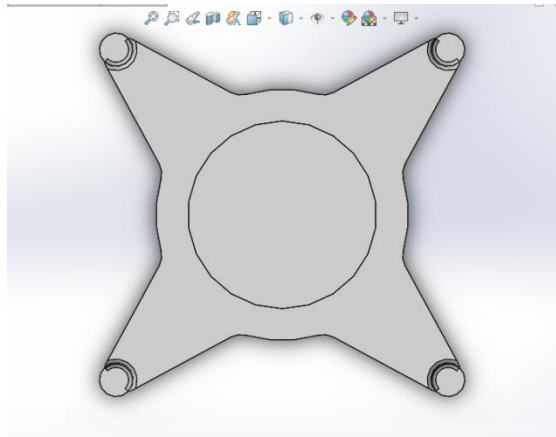
目前市场上的无人机主要采用的材料为碳纤维复合材料，材料成本高，加工工艺复杂，后期维修难度大。目前大多数无人机机架都是以碳纤维圆管与碳纤维薄板简单搭接的机架结构，以金属为主的机架很少见，而现有的机架结构设计要求也没有专门的规范。所以，设计一款便宜金属又制造方便的无人机机架有一定意义。

3.1 材料与基本属性

本次植保无人机的骨架结构采用了铝合金，对应的铝合金参数如下：铝合金的密度： $2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ；(E):6.9 GPa 的铝合金的弹性模量；铝合金的泊松比为 0.33；铝合金的屈服强度：27.57 MPa。

3.2 初始模型的尺寸及重量

如图 3-1 所示，机身长度为 1120mm，整体宽度为 1120mm，高度为 450mm。



3-1 四旋翼植保无人机机架的初始模型

3.3 初始模型的起飞工况

初始植保无人机模型由于没有简化、设计，所以自重达 47kg，对其可设计域没有去除多余材料，设计最大起飞重量 10kg。按照第二章设计升力 $F=31.06 \text{ N}$ 来进行初始模型的起飞工况验证，即对每个旋翼加装相同大小的力。来模拟空中飞行时受力情况。施加载荷效果如下图 3-2，进行静应力算例分析。

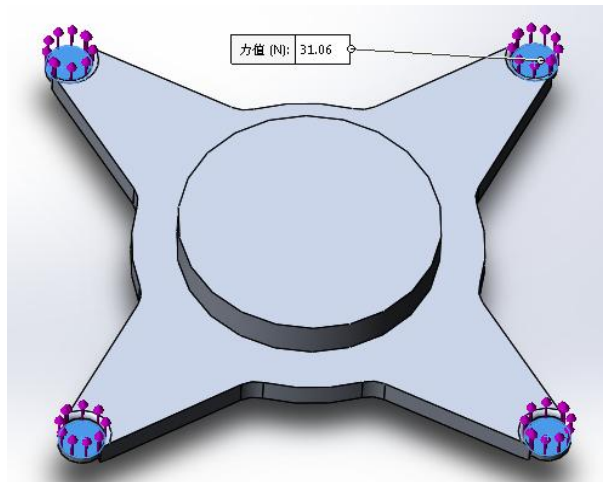


图 3-2 四旋翼植保无人机机架初始模型

3.4 初始模型的静力分析

对模拟起飞工况下，通过对植保无人机的初始模型进行静态分析，从图 3-3-3-4 中可以得出每个螺旋桨轴在起飞状态下的最大压力是 2.261 Mpa，如图 3-5 和 3-6 所示，在起飞状态下，每个螺杆的最大位移为 1.36 mm，如图 3-5 和 3-6 所示。

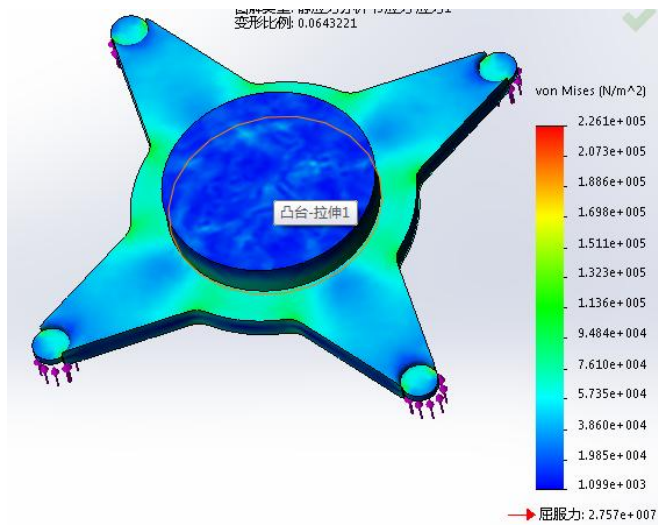


图 3-3 初始模型起飞工况下的应力云图 1

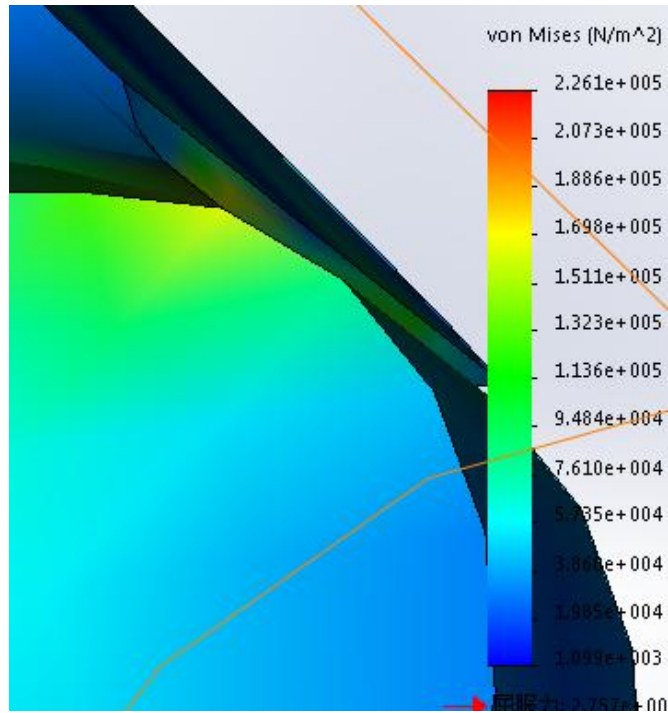


图 3-4 初始模型起飞工况下的应力云图 2

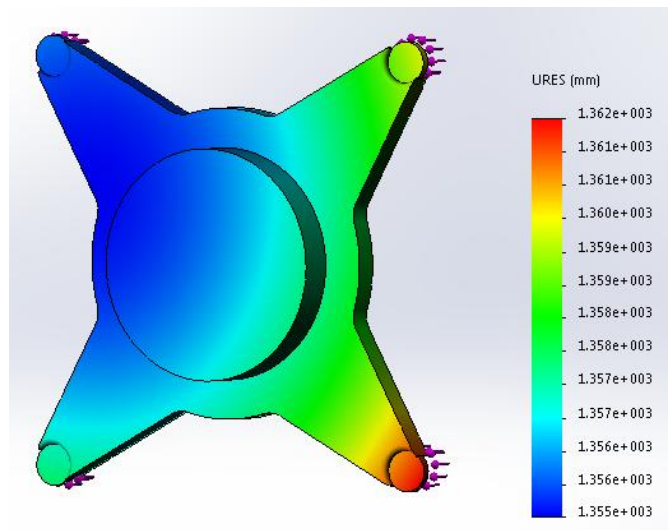


图 3-5 初始模型起飞工况下的位移云图

经分析发现，四旋翼无人机机身的初始模型在起飞状态下的最大应力和最大位移均在此限值内，即最大应力是在 2.75N/m^2 到 1.099N/m^2 范围之间的，最大位移也是在 1.355mm 到 1.361mm 范围之间的。因此，四旋翼无人飞机机架的初始模型，在满足起飞状态的情况下，也能达到设计要求。

3.5 初始模型的结构强度总结

从表 3-1 可以看出，这一种植保无人驾驶飞机，其起飞状态下的最大位移和最大应力，其初始状态为 47.8 公斤，其初始状态参数符合设计指标。

表 3-1 初始模型结构强度总结

工况	最大应力（屈服应力 100MPa）	最大位移/mm（目标 5mm）
起飞工况强度	2.261MPa	1.36mm

3.6 本章小结

完成对初始模型的三维建模，符合设计尺寸，对初始模型进行有限元分析，并满足设计需求强。

第四章 初始机架结构拓补优化

4.1 拓补优化原理

拓扑优化 (topology optimization)，是指一种根据给定的负载情况、约束条件和性能指标，在给定的区域内对材料分布进行优化的数学方法。拓扑优化包括尺寸优化、形状优化，是产品初始设计阶段确定产品的初始构型的有效手段。优化设计问题有三要素，即目标函数、设计变量和约束条件。目标函数是在设计域内的最优解，是关于设计变量的函数；设计变量是通过自身的改变来达到目标要求的一组参数；约束条件是设计的边界条件。

尺寸优化：优化对象为结构尺寸设计参数，确定长度、宽度、板厚、梁的截面宽度等结构参数值。

形状优化：优化对象为产品结构的形状，已知板内部有一个孔洞，通过优化设计确定该孔洞的形状

拓扑优化：优化对象为产品的拓扑结构，在优化前只知道产品形状的设计域，通过优化设计确定设计域内部的材料分布情况。

4.2 优化过程及优化后云图

植保无人机拓扑优化前处理设置

首先导入初始设计域模型进行几何清理，去除细小的倒圆角，并将整体模型切分为简单的可映射实体，以便 HyperMesh 软件自动划分六面体网格。网格划分采用 Multi Solid 功能，全选所有几何实体，设定平均网格尺寸为 5mm，网格类型设置为 mixed，即可自动划分六面体网格。划分好网格的模型共 506817 个单元。第二步，加载边界条件。四个旋翼分别提供竖直向上大小为 50N 的拉力，略大于初始设计拉力。机架承受有效载荷以、电池、雷达等部件，总重力设定为 170 N，略大于初始设计载荷。使用惯性释放方法，只需施加外载荷，不需要设置固定约束。设置控制卡片 PARAM 为-2，激活惯性释放功能。第三步，设置拓扑优化参数。本文的优化模型为机架整体应变能最小，约束其体积分数为 0.5。即优化后的机身体积不超过优化前机身体积的 50%。

使用 OptiStruct 软件求解上述模型，经过 32 步迭代后达到收敛。最终优化效果如图 4-1 和图 4-2 所示。图 4-1 中，红色区域表示密度较大的区域，即应当保留的部分。蓝色区域表示该部分单元密度较小，应当被去除。图 4-2 为去除密度小于 0.505 的区域后的结果。

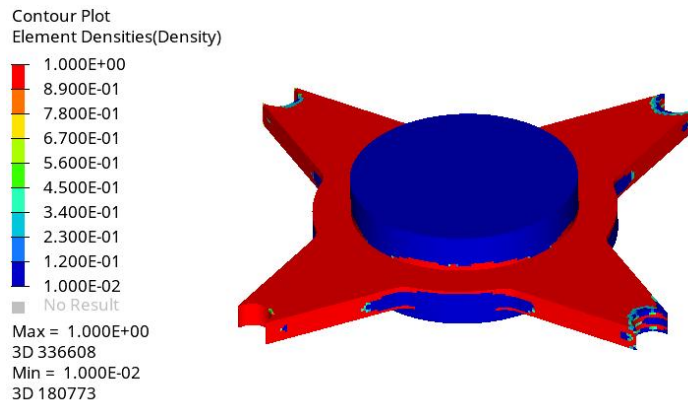


图 4-1 OptiStruct 优化结果

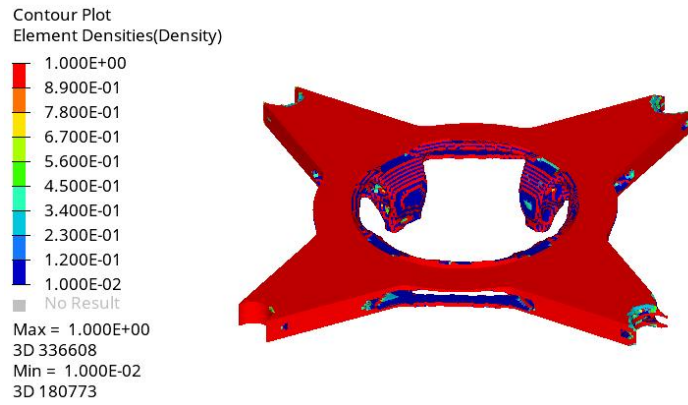


图 4-2 去除密度低于 0.505 的单元后的模型

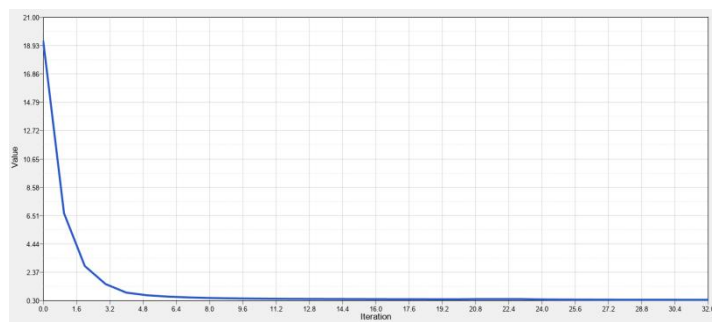


图 4-3 目标函数（即结构总体柔度）迭代曲线

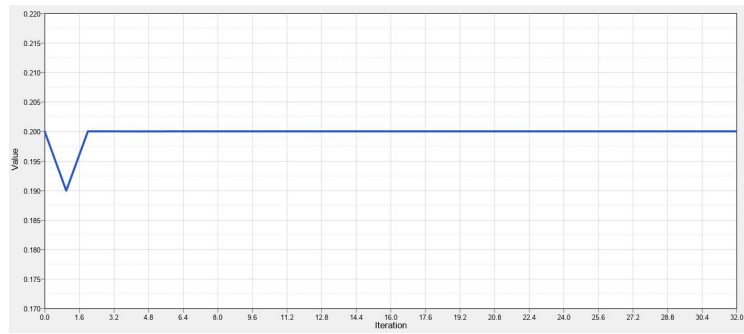


图 4-4 约束条件（即结构体积分数）迭代曲线

优化参数主要包括 3 方面：设计变量、目标函数、约束条件。目标函数就是应变能最小化，设计变量是每个单元的密度，在优化过程中会变化，变化范围从 0 到 1，约束条件是结构体积分数不超过 0.5。

第一次优化后效果，优化参数并不理想，优化参数调节过小，优化效果未达到较为理想结果，去除材料较少，四个旋翼未达到中心对称效果，显然，第一次优化由于经验缺少，未达到理想效果，调整设计变量参数，准备对其进行第二次优化。

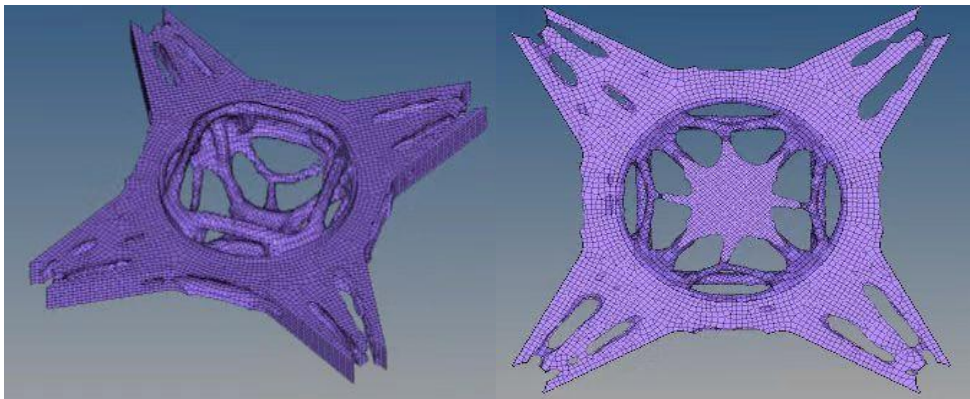


图 4-5 第一次优化后效果云图

同理优化，主要优化数据如上文所述，调整优化参数之后第二次优化后效果，上下中空，中间加强筋支撑。

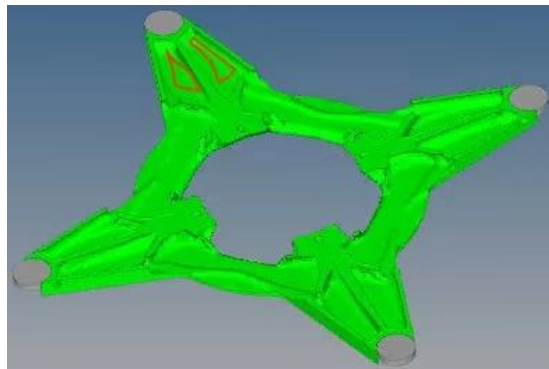


图 4-6 第二次优化后效果云图

对标红色的部分进行挖孔处理，结合两次拓补优化的结果对初始模型进行第二次建模。将整体机架结构进行合理设计，拆分为几部分，组装成为一个整体。

4.3 优化后建模

通过 Solidworks 软件对优化后的云图建模如下。考虑加工工艺及材料处理方式对部分结构进行优化简化处理。

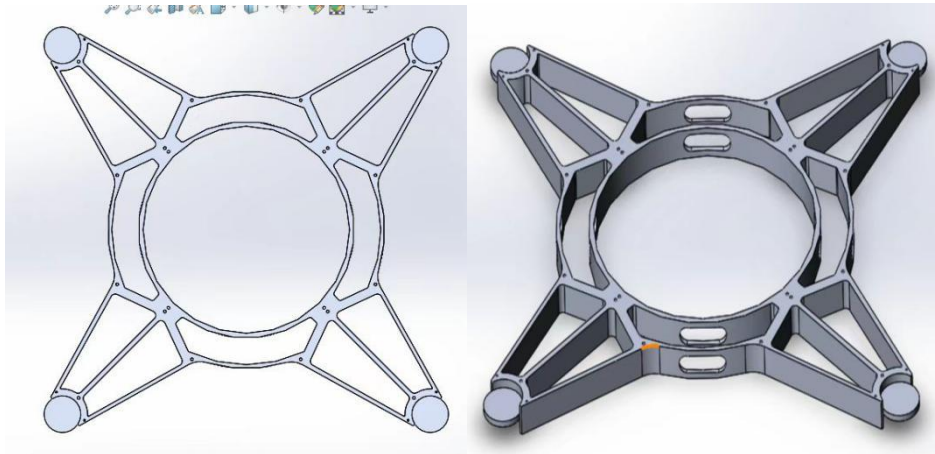


图 4-7 建模三维实体图（俯视图、立体图）

4.4 优化后模型静力载荷分析

对模拟起飞工况下该植保无人机的优化后模型进行静力学分析。得到该植保无人机的优化模型每支旋翼轴在起飞工况下所受的最大应力为 9.36MPa，最大位移为 6.4mm。

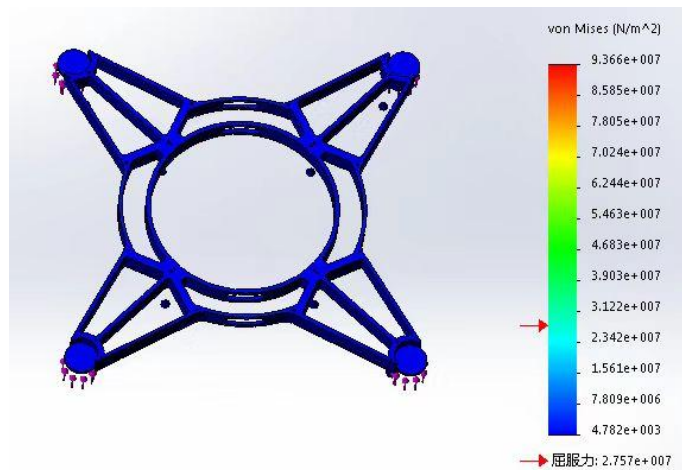


图 4-8 机架建模模型起飞工况下应力云图

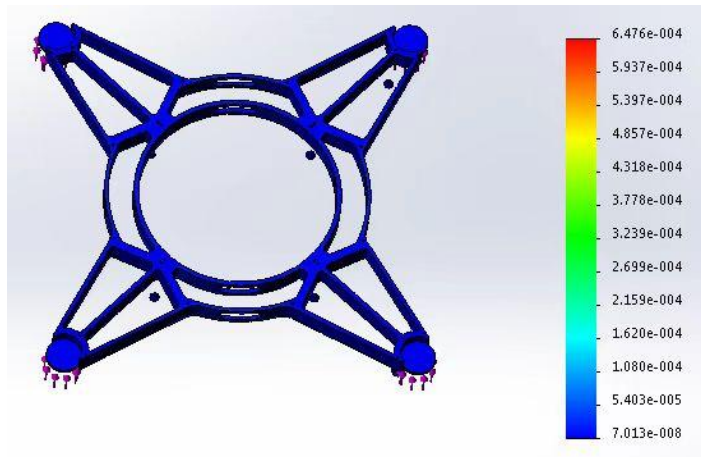


图 4-9 机架建模模型起飞工况下位移云图

通过分析可知，该四旋翼植保无人机机架的优化模型在起飞工况下的最大应力和最大位移都在该材料的允许范围之内，即最大应力是在 1.651 N/m^2 到 9.366 N/m^2 范围之间的，最大位移也在 7.01 mm 到 1.08 mm 范围之间。所以该四旋翼无人机机架的优化模型在起飞工况下仍满足设计要求。

4.5 其余部件建模

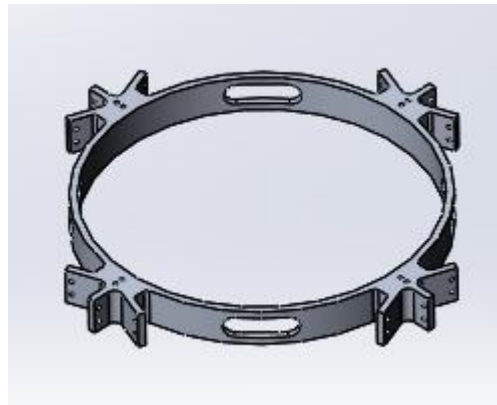


图 4-10 中间连接结构

主要连接件，连接中控与药箱，对药箱进行稳定连接。是植保机的主要中心连接件。

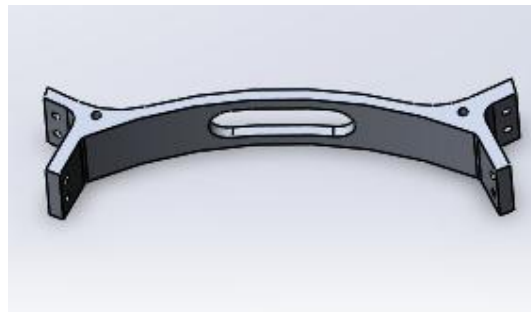


图 4-11 机臂连接结构

主要连接四个旋翼，让植保机旋翼处于同一平面，受力更加平稳，其次，与机架中间连接部位相连，机体更加牢固、稳定。

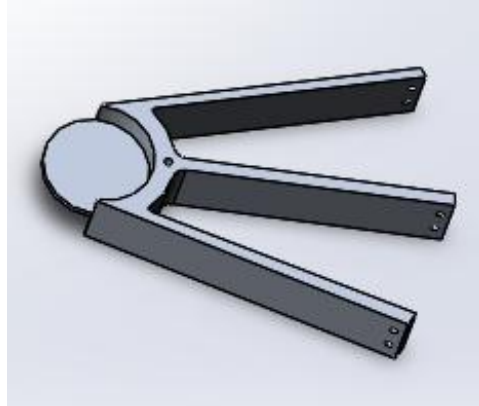


图 4-12 机臂结构

主要安装电动机，提供稳定升力，与机架中心位置、机臂连接结构相连，形成稳定的供力结构，加强机身整体，提供了稳定的升力。

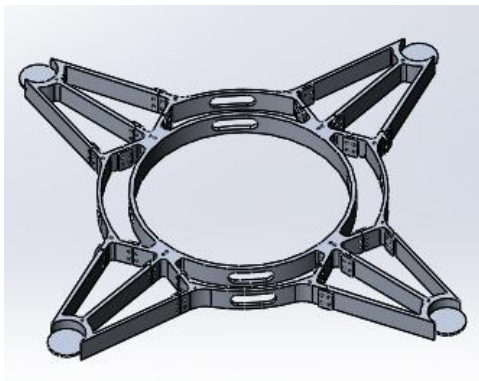


图 4-13 机架装配体

连接以上图 4-10、图 4-11、图 4-12，3 个主要部件，装配完成的机架结构，呈中心对称结构，具备良好的互换性，可以快速、高效、便捷的安装使用。

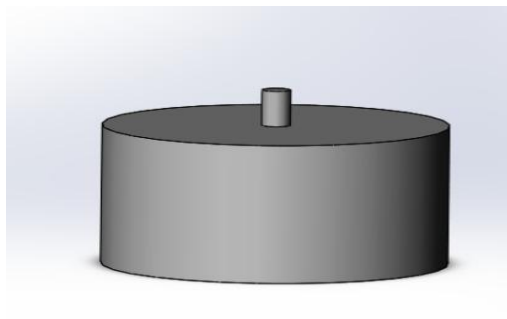


图 4-14 模拟电机

电动机，为植保无人机提供动力。

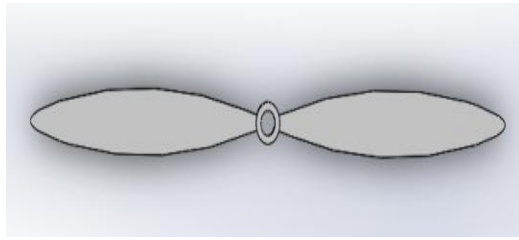


图 4-15 模拟扇叶

螺旋桨，和电动机配合使用，为植保无人机提供升力。

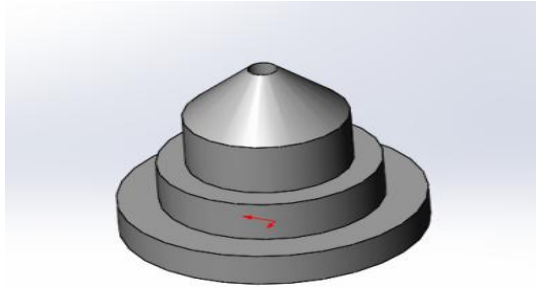


图 4-16 模拟喷头

药物喷洒喷头，通过该喷头使药物以一定速度喷出，改变药物喷射距离，也使得药物呈雾状洒向农作物。

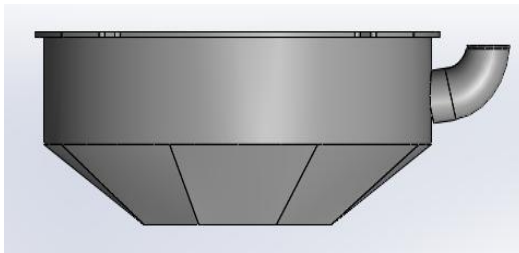


图 4-17 模拟药箱

药箱，主要为植保无人机承载农药，呈倒锥形可以更好地喷洒完药物，减少药物残留。

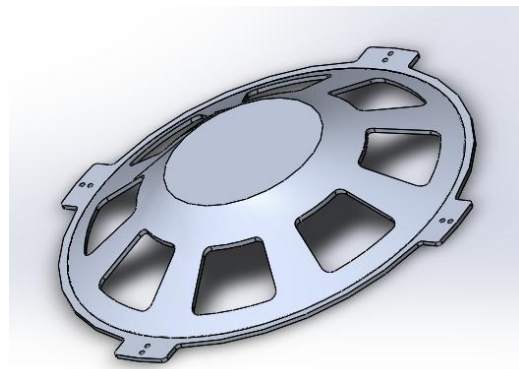


图 4-18 模拟上盖板

上盖板，主要保护电池、飞控、电调等机载设备，中间空洞可加装透明硬性塑料，可观察内部机载设备有无损坏，方便维修观察。

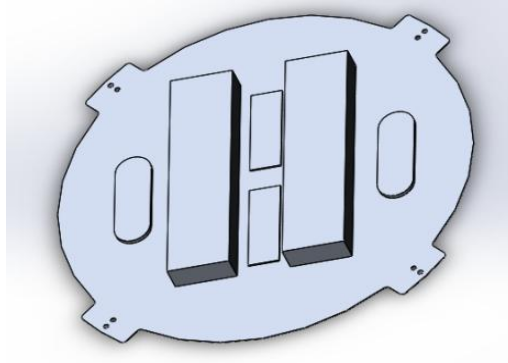


图 4-19 模拟中控板

模拟中控板，主要在上面安装电池、飞控、电调等机载设备。以达到固定状态，不随飞行状态所受影响。

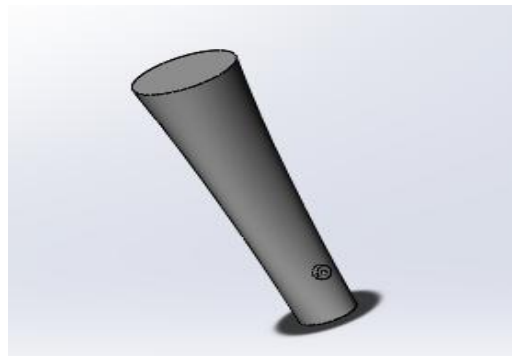


图 4-20 模拟转换接头

转换喷头，主要由于植保无人机在喷头与机臂药管连接时会存在一定高度差，使得农药喷洒效果不好，转换接头主要起转换作用，连接喷头与药管，可以更好地喷洒药物。

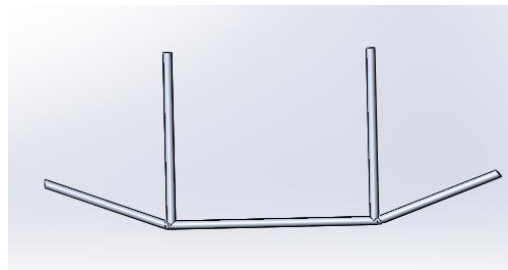


图 4-21 模拟起落支架

起落支架，主要为植保无人机提供在地面时的支撑作用，保护无人机的重要部位。

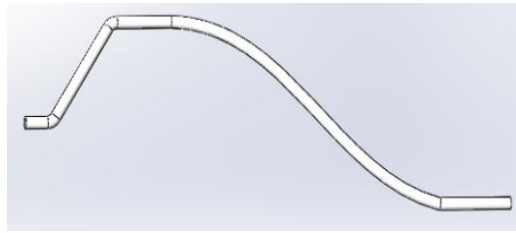


图 4-22 模拟输送药管

药管，主要连接药箱与转换喷头，将农药通过药管输送至喷头，进行药物喷洒作业。

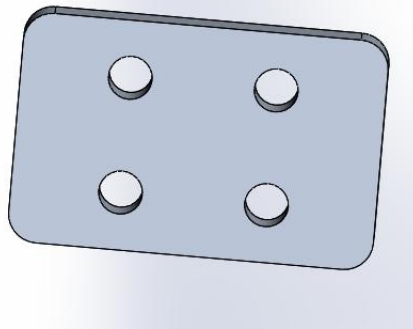


图 4-23 机架连接片

主要是将机架的拆解部件进行安全稳固的连接，已达到满足起飞状况所需状态。

4.6 装配完模型图样

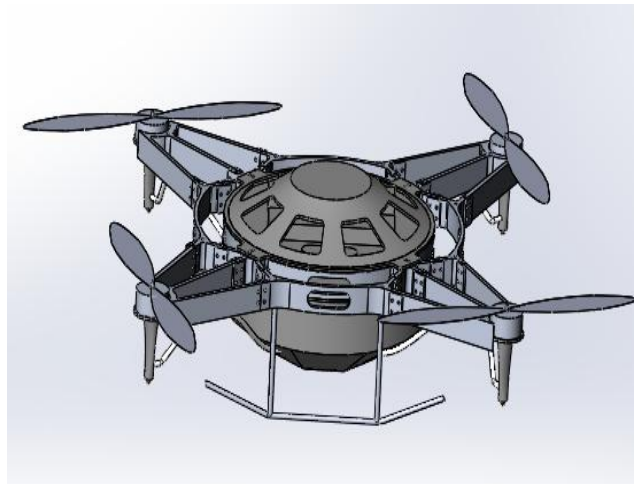


图 4-24 总体装配图

对三维建模部件进行安装配合，完成装配。

数据对比如下表 4-1:

表 4-1 优化前后数据对比

有效载荷：10 kg		
	优化前/kg	优化后 /kg

机架模型	47.9	9.8
较机架模型减重	38.1	
较初始模型减重比	79%	
一般植保无人机自重（含药箱、电池、）	10 kg	
预估计设计植保无人机自重（含药箱、电池、）	11.8 kg	

4.7 本章小结

对初次建模的植保无人机机架进行优化，使用 HyperMesh 软件对其进行网格划分，调试参数，使用 OptiStruct 软件求解上述模型，得出优化后模型云图，然后用 Solidworks 软件对其云图进行三维建模，得到以上图片，建立基础模型。再对建立的模型进行有限元分析，得到该模型的强度验证。得出结果，经有限元分析第二次建模结果的机架满足结构所需强度，完成其余部分部件的三维建模，进行材料选定，组合装配。

第五章 总结及展望

5.1 工作总结

本文以植保无人机机架结构的优化设计为对象进行了研究，然后，以大疆植保无人机性能作为设计要求，设计了一款铝合金材质的四旋翼植保无人机机架，以此为例，完成了对铝合金材质的四旋翼无人机机架的概念设计。铝合金材质机架的使用减少了机架材料成本，降低了加工难度和加工成本。

本文主要工作如下：

- (1) 完成植保机机架架构设计优化。
- (2) 利用 Solidworks 软件对设计出来的各部件进行三维绘图建模。运用 Solidworks 软件，构建模型，对机架及连接部件建模，并模拟受力分析。
- (3) 对设计优化出的机架结构部件进行受力分析和有限元分析。
- (4) 利用 Hypermesh 软件对其进行优化拓补，使用惯性释放方法，只需施加外载荷，不需要设置固定约束。使用 OptiStruct 软件求解上述模型，经过 32 步迭代后达到收敛。
- (5) 考虑加工工艺、制造、运输和维修等因素，对概念机架结构进行了优化改进，把零部件连接组装成机架，方便运输和维修。最后对设计好的机架结构进行了强度校核和极限工况校核，满足强度要求，得到了设计较为成熟的机架。
- (6) 本文应用铝合金作为植保无人机机架的材料，打破了市面上植保无人机主要以碳纤维圆管做机臂与以碳纤维上、下薄板做中控室简单搭接的传统的机架结构的现状。使机架结构受力更加合理，材料更少冗余，降低了机架加工制造的费用以及后期的维修费用。

5.2 展望

本文对四旋翼植保无人机的机架设计进行了归纳和总结，提出了四旋翼植保无人机机架的概念设计及三维建模和有限元分析。

因此可以进一步研究：

- (1) 对机架结构进行试制并组装进行飞行测试，根据试飞数据对机架结构进行再次优化。
- (2) 本文拓扑优化只考虑了最小应变能一种目标，接下来还可以把材料的生产和加工成本考虑作为第二个优化目标，进行多目标优化。综合考虑，设计一款强度高、质量轻、成本低的四旋翼植保无人机机架。

(3) 运用软件进行真实受力分析，对其进行二次优化，对更多的材料进行去除，设计可折叠机构，可以有效减少占地空间，验证其强。

致 谢

行文至此，落笔为终。我与航院的故事始于 2018 年金秋，终于 2022 年盛夏。逐梦航院，终要别离。目之所及，皆是回忆。纵有万般不舍，但仍心存感激。感谢母校四年来的关怀，“崇实、求精、致良知”铭记于心，伴我成长。

身逢盛世，与有荣焉。感谢党和国家给我提供了和平、舒适的学习环境和平等教育的机会，大学四年以来，幸得老师关怀与悉心培养，让我可以安心完成学业，逐渐成长为一名有知识、有理想的青年。

桃李不言，下自成蹊。首先感谢我的导师张健老师，专业知识渊博，为学严谨认真，待人和蔼可亲，体恤学生，指导有方，让我由衷敬佩，特别是在论文写作过程中，从选题时的反复斟酌，到写作中的实时敦促、再到后期的回复批注，张老师所倾注的心血难以计量。饮其流时思其源，成吾学时念其师。衷心的感谢每个阶段的各个老师。传道解惑，指引迷津。求学十余载，良师难得，定将一生铭记，一生感恩。

父母之爱子，则为之计深远。感谢我的父母 20 多年来对我无微不至的照顾与支持，让我站在他们的肩膀上，见识到了他们所没有见过的繁华。也非常感谢我的姐姐和我姐夫，有他们在我背后默默付出，鼓励我。资助我完成大学学业。焉得艾草，言数之背，养育之恩，无法为报，只想不断努力，成为你们骄傲。

以梦为马，不负韶华。感谢普通的自己一路平凡而又不断前行。我生来平平淡淡，没有显赫家世，惊艳不了青春，斑驳不了岁月，但我坚信人间的点滴温暖都值得我前进，而努力对我的意义就是：当好运来临的时候，我觉得我值得。

参考文献：

- [1] 陈涛,张汉,张巍警. 机翼折叠机构的设计研究与动力学分析[J]. 机械设计, 2019, 36(S2) : 206-209. DOI:10.13841/j.cnki.jxsj.2019.s2.051.
- [2] 吴亚萍. 果园植保机械应用现状及发展趋势[J]. 林业科技通讯, 2021(10) :63-66. DOI: 10.13456/j.cnki.lykt.2020.12.20.0001.
- [3] 张永庆. 浅析 COSMOSWORKS 在有限元分析中的应用[J]. 机械, 2005, 000(0S1) :53-55.
- [4] 王卫斌. 磨炼高超技能服务乡村振兴[N]. 吕梁日报, 2021-11-16(002). DOI:10.28546/n.cnki.nlvr.2021.002422.
- [5] 刘向尧, 杨登红, 詹家礼. 国内植保机行业的研究现状与展望[J]. 贵州农机化, 2019(01) :11-18+51.
- [6] 邱振球, 吴生根, 吴安文, 杜金平, 罗建军, 付庶辉. 现代高效植保机械在进贤县发展现状及发展前景的探讨[J]. 江西农业, 2017(01) :125-126. DOI:10.19394/j.cnki.issn1674-4179.2017.01.104.
- [7] 王旭景, 刘绍锋. 无人植保机的结构原理与推广应用[J]. 时代农机, 2015, 42(06) :10-11+14
- [8] 柳琪. 无人机正在快速替代传统植保机[J]. 农机市场, 2020(12) :12..
- [9] 吴天. 两款新型植保无人机[J]. 农村新技术, 2020(12) :43.
- [10] Toyo Jidoki Co. Ltd.; Patent Issued for Gripper Device For A Bag Filling And Packaging Machine (USPTO 10,800,563)[J]. Journal of Engineering, 2020, : 8626-.
- [11] 赵长峰. 多旋翼无人机机架结构拓扑优化及极限工况校核[D]. 吉林大学,2020.DOI: 10.27162/d.cnki.gjlin.2020.006587.
- [12] 周国毅. 水稻机械化高效植保作业技术的运用探讨[J]. 种子科技, 2020, 38(15) : 95-96.
- [13] 李贵林. 三轴振动夹具结构设计与动力学优化分析[D]. 西安电子科技大学,2020.DOI: 10.27389/d.cnki.gxadu.2020.000565.
- [14] 金若成. 巴州农用植保无人机推广使用情况分析[J]. 新疆农机化, 2020(06):33-35.DOI: 10.13620/j.cnki.issn1007-7782.2020.06.011.
- [15] 纪明山. 植保无人机应用现状与发展趋势[J]. 新农业,2016(20):38-40.
- [16] 高鸿渐. 微型碳纤维四旋翼无人机结构设计与优化[J]中国民用航空飞行学院, 2018.